

## ТЕКСТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МИШЕНЕЙ ИЗ СПЛАВА Ti-6Al-4V ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

В.А. Шулов<sup>1)</sup>, А.Н. Громов<sup>1)</sup>, Д.А. Теряев<sup>1)</sup>, Г.Г. Ширваньянц<sup>1)</sup>,  
Ю.А. Перлович<sup>2)</sup>, М.Г. Исаенкова<sup>2)</sup>, В.А. Фесенко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Московский авиационный институт (государственный технический университет),  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия, shulovva@mail.ru

<sup>2)</sup>Московский инженерно-физический институт,  
Каширское шоссе, 31, Москва, 1115409, Россия, perlovich@mail.ru

Исследована текстура, формируемая в перекристаллизованном материале поверхностного слоя деталей из сплава ВТ6 при их облучении сильноточным импульсным электронным пучком (СИЭП) в режиме плавления. Облучение СИЭП при этом режиме приводит к формированию в поверхностном слое толщиной до 20 мкм текстуры сжатия и мелкодисперсной глобулярно-пластинчатой микроструктуры, с ориентацией  $\alpha$ - $\alpha'$ - $\alpha''$  пластин параллельно или почти параллельно поверхности. Все это должно привести к повышению усталостной прочности при испытаниях на изгиб.

### Введение

В [1] изучалось влияние режимов электронно-лучевой и финишной термической обработки на эксплуатационные свойства лопаток из  $\alpha$ - $\beta$ -титанового сплавов ВТ6, в результате чего было установлено, что, используя облучение СИЭП в ускорителе «Геза-1» [2] при энергии электронов 115-120 кэВ, плотности энергии 18-20 Дж/см<sup>2</sup> и числе импульсов более 2 удается повысить следующие характеристики лопаток: предел выносливости - от 10 до 40 %; эрозионную стойкость - более чем в 2 раза, жаростойкость - более чем в 3 раза; сопротивление горячей солевой коррозии - более чем в 4 раза [1].

В работе [3] рассматривался вопрос о причинах повышения усталостной прочности обработанных СИЭП лопаток из сплава ВТ6. Облученные при плотности энергии 18-20 Дж/см<sup>2</sup> и числе импульсов более 2 лопатки из сплава ВТ6 характеризовались повышением предела выносливости  $\sigma^{-1}$  на 20% непосредственно после обработки СИЭП и на 40% после финишной термообработки при 520-560 °С в вакууме 10<sup>-6</sup> мм. рт. ст. в течение 2 часов. Методами оптической металлографии (рис. 1) и просвечивающей электронной микроскопии было показано, что облучение СИЭП в режиме плавления приводит к формированию в поверхностном слое толщиной до 20 мкм тонкодисперсной глобулярно-пластинчатой микроструктуры с ориентацией пластин почти параллельно поверхности (зона 1 - закалка из жидкости). Последнее может привести к повышению предела выносливости. Еще одной причиной этого может быть текстурообразование в поверхностном слое при облучении СИЭП.

В этой связи целью настоящей работы являлось исследование текстуры, формируемой в перекристаллизованном материале поверхностного слоя деталей из сплава ВТ6 при их облучении СИЭП в режиме плавления.

### Материалы, оборудование и методики исследования

В качестве объектов исследования в настоящей работе использовались образцы диаметром 24 мм и толщиной 5 мм из сплава ВТ9 [3],

лопаток компрессора ГТД РД33, применяемым на ММП имени В.В. Чернышева. Состояние материала в поверхностных слоях лопаток исследовалось методами: рентгеноструктурного анализа, просвечивающей электронной микроскопии и оптической металлографии. Обработка мишеней СИЭП [2] была реализована в ускорителе «Геза-1» в режиме плавления: энергия электронов - 120 кэВ; длительность импульса - 30 мкс; плотность энергии в пучке - 18-20 Дж/см<sup>2</sup>; площадь поперечного сечения пучка - 80 см<sup>2</sup>; неоднородность плотности по сечению пучка - менее 10 %. В качестве объектов исследования в настоящей работе использовались образцы толщиной 4 мм и диаметром 26 мм, вырезанные из прутков, из которых изготавливаются серийные лопатки вентилятора из сплава ВТ6 ГТД РД33. Состояние материала в поверхностных слоях образцов исследовалось методами: рентгеноструктурного анализа (РСА), рентгеновского микроанализа (РМА), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и оптической металлографии при послойном удалении материала поверхностного слоя с помощью тонкого ручного полирования и химического травления. Обработка мишеней СИЭП [1,2] была реализована в ускорителе «Геза-ММП» при следующих режимах: энергия электронов - 120 кэВ; длительность импульса - 30 мкс; плотность энергии в пучке - 18-20 Дж/см<sup>2</sup>; площадь поперечного сечения пучка - 80 см<sup>2</sup>; неоднородность распределения плотности энергии по сечению пучка - менее 10 %. После облучения из мишеней механическим, электрохимическим и химическим методами приготавливались тонкие фольги для определения микроструктуры в объемных слоях и в перекристаллизованном слое на различных глубинах с помощью ПЭМ [3].

### Экспериментальные данные и их обсуждение

В рассматриваемом случае поверхностной модификации пучком электронов кристаллизация расплавленного слоя будет протекать с образованием разных текстур в случаях, когда она происходит независимо от подложки или с повторением ориентации ее зерен (рис.1, зона 1); текстура

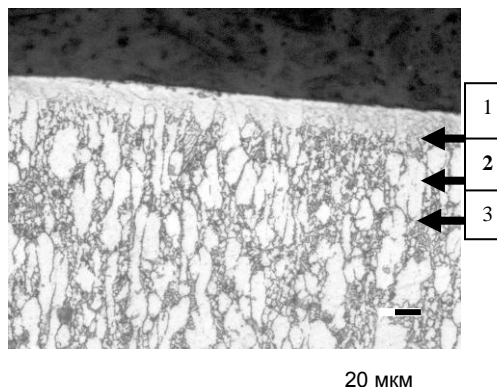


Рис. 1. Микроструктура в поверхностном слое мишеней из сплава ВТ6, подвергнутых обработке СИЭП четырьмя импульсами при энергии электронов - 120 кэВ, длительности импульса - 30 мкс и плотности энергии в пучке - 18-20 Дж/см<sup>2</sup>.

слоя, претерпевшего нагрев до температур  $\beta$ -области с последующей закалкой, будет обнаруживать большее или меньшее рассеяние по сравнению с исходной в зависимости от того, будут ли реализовываться все варианты ориентационного соотношения между  $\beta$ - и  $\alpha$ -фазами при  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  превращениях, ведущих к размножению исходных ориентаций (рис. 1, зона 2). Отклонение наблюдаемых текстур от прогнозируемых указывает на существование эффектов, не учитываемых при априорном анализе ситуации.

Некоторые результаты исследования представлены на рис. 2-4. Из рис. 2 видно, что исходные прутки из титановых сплавов были получены прокаткой в  $\beta$ -области, так что при температуре деформации в них должна была сформироваться текстура изделий с аксиальной симметрией, характерная для металлических материалов с ОЦК-решеткой: с осью растяжения вдоль оси прутка должны совпадать кристаллографические оси  $\langle 011 \rangle$ . При этом другие оси того же типа располагаются на угловых расстояниях  $60^\circ$  и  $90^\circ$  от оси прутка.

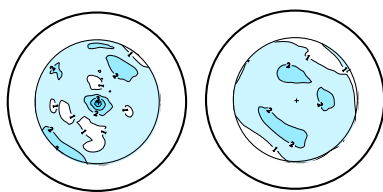


Рис. 2. Прямые полюсные фигуры  $\{0001\}$  и  $\{11.0\}$   $\alpha$ -фазы необлученного образца из сплава ВТ6.

Последующее охлаждение прокатанного прутка сопряжено с прохождением  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения при ориентационном соотношении  $\{011\}_\beta \parallel \{0001\}_\alpha$ ,  $\langle 111 \rangle_\beta \parallel \langle 11.0 \rangle_\alpha$ . В результате зерна образующейся  $\alpha$ -фазы имеют такие ориентации, при которых их базисные оси  $[0001]$  расположены параллельно осям  $\langle 011 \rangle$  исходной  $\beta$ -фазы. Если в исходной  $\beta$ -фазе формируется аксиальная текстура, то та же аксиальная текстура будет наследоваться и  $\alpha$ -фазой.

В отношении текстуры исходных прутков остается вопрос, касающийся преобладания в текстуре растяжения остаточной  $\beta$ -фазы компоненты  $\langle 001 \rangle$ , наблюдаемой на полюсных фигурах необлученных образцов. В этой связи можно сослаться на появление оси  $\langle 001 \rangle$  в качестве направления растяжения или прокатки в некоторых сплавах с ОЦК-решеткой, особенно – при повышенных температурах деформации.

Сопряженное с облучением сжатие объясняет формирование в таблетках текстуры, резко отличающейся от исходной. В  $\beta$ -фазе вдоль нормали к оси таблетки, совпадавшей в исходном прутке с направлением растяжения, под облучением устанавливаются оси  $\langle 001 \rangle_\beta$  и  $\langle 111 \rangle_\beta$ , устойчивые в ОЦК-решетке по отношению к деформации сжатием. Соответственно, в текстурах сжатия металлических материалов с ОЦК-решеткой главными являются компоненты, в зернах которых перпендикулярно оси сжатия располагаются плоскости  $\{001\}$  и  $\{111\}$ .

После  $\beta \rightarrow \alpha$  фазового превращения при соблюдении указанного выше ориентационного соотношения в зернах образовавшейся  $\alpha$ -фазы альтернативно реализуются две возможности: (1) базисные плоскости  $\{0001\}$  отстоят от плоскости поверхности на  $45^\circ$  (и на  $90^\circ$ ), (2) плоскости  $\{11.0\}$  параллельны плоскости поверхности или отстоят от нее на  $60^\circ$ . (Эти ориентировки устанавливаются при анализе построенных полюсных фигур с помощью стандартных стереографических проекций).

Однако, если текстура растяжения исходного прутка в первом приближении была аксиальной, формирующаяся вместо нее текстура сжатия таковой не является. По-видимому, это связано с особенностями переориентации зерен в условиях осевой деформации. Чтобы из аксиальной текстуры растяжения сформировалась аксиальная текстура сжатия, все зерна должны деформироваться и переориентироваться взаимно независимо. Между тем, первоначальная активизация скольжения лишь в каких-то зернах придает начавшейся деформации асимметричный характер и превращает ее из аксиальной в двухосную. В результате, переориентация зерен, начавших деформироваться позднее первых, каким-то образом адаптируется к их переориентации, так что вместо кольца на полюсных фигурах  $\{011\}_\beta$  или производной  $\{0001\}_\alpha$  мы получаем 4 изолированных максимума, соответствующих единственной ориентировке  $\beta$ -зерен, симметричной относительно нормали к поверхности таблетки и устойчивой по отношению к сжатию вдоль этой нормали (рис. 3).

Структурные изменения в поверхностном слое в результате облучения видны из результатов металлографического анализа (рис. 4) и данных ПЭМ [3]. Отсюда непосредственно следует, что в результате высокоскоростной перекристаллизации формируются тонкодисперсная микроструктура с повышенной плотностью дислокаций и текстура сжатия, отличная от исходной аксиальной текстуры. Эти изменения приводят к упрочнению материала в поверхностном слое толщиной до 20 мкм [1].

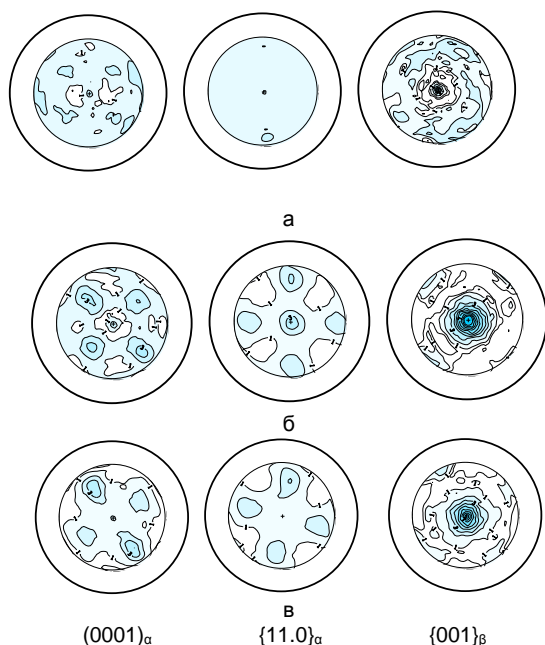


Рис. 3. ППФ (0001), {11.0} α-фазы и {001} β-фазы для поверхностного слоя образцов из сплава ВТ6, подвергнутых облучению электронным пучком при плотности энергии 18-20 Дж/см<sup>2</sup>: а – съемка с поверхности, б – съемка после удаления поверхностного слоя толщиной 10 мкм, в – съемка после удаления поверхностного слоя толщиной более 20 мкм.

### Заключение

Методами рентгеноструктурного анализа, оптической металлографии и просвечивающей электронной микроскопии показано, что облучение СИЭП в режиме плавления приводит к формированию в поверхностном слое толщиной до 20 мкм текстуры сжатия и мелкодисперсной глобулярно-пластинчатой микроструктуры, с преимущественной ориентацией α- α' - α'' пластин параллельно или почти параллельно поверхности. Все это должно привести к повышению усталостной прочности при испытаниях на изгиб.

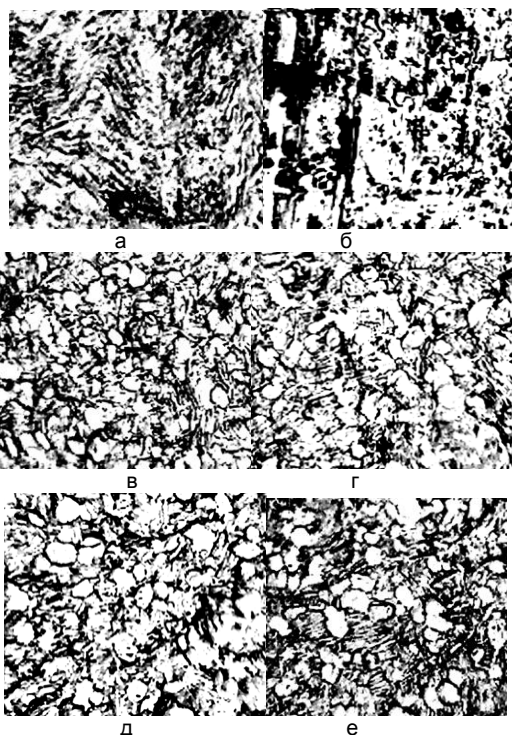


Рис. 4. Микроструктура образцов из сплава ВТ6 в исходном состоянии (а) и после облучения при плотности энергии 18-20 Дж/см<sup>2</sup> (б) и после удаления поверхностных слоев толщиной 10 (в), 20 (г), 30 (д) и 40 (е) мкм.

Работа поддержана Минобрнауки РФ.

### Список литературы

1. Шулов В.А., Новиков А.С., Энгелько В.И. Сильноточные электронные импульсные пучки для авиационного двигателестроения. М.: Изд-во Артек, 2012. 292 с.
2. Engelko V, Yatsenko B., Mueller G., Bluhm H.// J. Vacuum. 2001. V. 62. P. 211-214.
3. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А. и др.// Физика и химия обработки материалов. 2012. № 3. С.18-25.
4. Erlovich Yu.A., Isaenkova M.G., Fesenko V.A. Materials Processing and Texture, Ceramic Transactions. V. 200. 2008. P. 539-546.

## CREATION OF TEXTURE INTO SURFACE LAYERS OF TARGETS FROM Ti6Al4V TITANIUM ALLOY DURING THEIR IRRADIATION WITH INTENSE PULSED ELECTRON BEAMS

V.A. Shulov<sup>1)</sup>, D.A. Teryaev<sup>1)</sup>, A.N. Gromov<sup>1)</sup>, G.G. Shirvan'yantz<sup>1)</sup>,  
Yu.A. Perlovich<sup>2)</sup>, M.G. Isaenkova<sup>2)</sup>, V.A. Fesenko<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Moscow Aviation Institute,

4 Volokolamskoye shosse, A-80, GSP-3, Moscow 125993, Russia, shulovva@mail.ru

<sup>2)</sup>Moscow Engineering Physics Institute,

31 Kashirskoye shosse, Moscow, 115409, Russia, perlovich@mail.ru

The present paper reviews the X-ray experimental results dedicated to the texture formation into surface layer of gas turbine engine blades from VT6 refractory α+β-titanium alloy as a result of irradiation with intense pulsed electron beams.